

## 宁夏中南部调水工程受水区水资源配置效果评价

李金燕, 郭 娇, 崔岚博, 窦 森

(宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

**摘 要:** 宁夏中南部调水工程是宁夏境内唯一的大型调水工程, 该项工程的实施, 必将会对受水区水资源配置格局产生巨大的影响。基于水资源配置的多目标性和模糊不相容性的特点, 开展宁夏中南部调水工程受水区水资源配置及效果评价研究, 进一步明确中南部调水工程对水资源配置格局的影响。从生活优先、生态优先2个角度出发, 选取2020、2025年规划水平年, 分别设置有、无中南部调水工程参与的水资源配置方案集, 从社会、经济以及生态3个方面对评价指标进行选取, 并创建相应的评价指标体系; 分别采用主成分分析法和模糊物元综合评价方法对水资源配置结果进行评价, 并将2种评价方法的最后得分值按优劣大小排序做对比分析。2种评价方法均表明基于生态优先的有宁夏中南部调水工程参与的水资源配置方案最优; 其中模糊物元评价结果表明, 凡是采用了中南部工程调水的方案均比没有中南部调水工程的方案优, 而主成分分析的评价结果优劣差异较为明显, 除了表明采用中南部工程调水的方案均比没有中南部调水工程的方案优, 还可以发现受水区配置的水资源量越多, 方案越优。这个结果同时也说明2种评价方法用于水资源配置效果评价均具有一定的合理性, 而宁夏中南部调水工程的参与对于受水地区的经济发展起到了很大的推动作用, 同时还提升了区域生态环境效益。

**关 键 词:** 中南部调水工程; 水资源配置; 水资源配置效果评价; 主成分分析法; 模糊物元综合评价

**文章编号:**

宁夏中南部调水工程是将宁夏南部六盘山东麓水量相对较丰富的泾河流域地表水, 输送到宁夏清水河流域干旱缺水区的跨流域调水工程, 也是宁夏境内唯一的大型调水工程。该工程受水区规划范围涉及到宁夏中南部的原州区、西吉县、彭阳县、海原县(以下简称受水区)的45个乡镇, 767个行政村, 规划供水面积10624 km<sup>2</sup>。受水区属黄河中游黄土高原丘陵沟壑区, 地形复杂, 干旱少雨, 当地水资源具有“量少、质差、分散”的特征。要解决这一地区水资源短缺及生态环境脆弱的问题, 必须通过外部调水, 即南引泾河水——将宁夏南部泾河流域丰富的地表水通过拦蓄、截引向北输送到受水区; 北扬黄河水——将宁夏境内黄河水通过多级泵站加压输送到受水区部分区域。面对受水区“北扬黄河水, 南引泾河水”, 结合当地地表水、地下水的多水

源供水格局, 怎样合理、充分利用各种供水水源, 才能发挥水资源最大的经济效益、社会效益与生态环境效益, 成为困扰当地政府及水行政部门的一个尖锐问题, 尤其是面对宁夏中南部调水工程已经全面实施的现实情况, 解决其多水源合理配置问题更是迫在眉睫。然而, 在水资源配置的过程中, 由于区域水资源配置系统各因素相互影响和相互制约的机制极其复杂, 效果的表现形式各种各样, 在模型中充分反映众多不确定因素影响也很困难, 因此由配置模型得到的水资源配置结果, 仅仅是模型目标意义上的最优方案。同时, 对于受水区来说, 调水工程无论就实施建设过程, 还是对用户供水过程, 都会产生一定的影响, 不仅改变了受水区原本的水资源供用水结构, 而且重组了水源地及受水区的水资源系统。因此, 为了全面分析调水工程对受水区

收稿日期: 2020-09-22; 修订日期: 2020-12-08

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2021AAC03018); 宁夏自然科学基金项目(2019AAC03046); 国家自然科学基金项目(51569024)和宁夏大学水利工程一流学科(NXYLXK2021A03)资助

作者简介: 李金燕(1976-), 女, 博士, 教授, 主要从事旱区水环境与水土资源调控研究. E-mail: lijinyan001@163.com

产生的影响,全面反映水资源配置方案的效果,本文在水资源配置方案基础上,进行更高层次的方案综合评价,从经济、社会和生态环境等方面对各方方案进行全面的综合优选,并以综合优选结果作为决策依据。有助于选择符合区域实际的水资源配置方案,使水资源配置研究成果更好地指导或应用于区域水资源管理中。

## 1 水资源优化配置模型

水资源配置效果评价所建立的评价指标都不是直接指标,需要以水资源优化配置结果作为评价指标体系量化的中间指标,最终计算得出评价指标体系的量化值<sup>[1]</sup>。因此,首先需要对区域的水资源进行优化配置,过程如下:

### 1.1 目标函数

(1) 社会目标:本文选取缺水最小作为社会目标,用  $f_1(x)$  表示,计算公式如下:

$$f_1(x) = \min \left[ D_t - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I x_{ij}^k \right] \quad (1)$$

式中:  $D_t$  为规划年城市需水量 ( $10^4 \text{ m}^3$ );  $t$  为规划年;  $x_{ij}^k$  为  $k$  子区水源  $i$  用户  $j$  的取水量 ( $10^4 \text{ m}^3$ );  $I$  为供水水源个数;  $J$  为区域内用户个数;  $K$  为区域个数,下同。

(2) 经济目标:以实现国内生产总值最大为主要经济目标,用  $f_2(x)$  表示,计算公式如下:

$$f_2(x) = \max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I x_{ij}^k \times \text{gdp}_j \quad (2)$$

式中:  $\text{gdp}_j$  为用户  $j$  单方水所产生的 GDP (元)。

(3) 生态环境目标:受水区的生态环境目标是将污染物的排放量降到最小,采取  $f_3(x)$  来代表,计算公式如下:

$$f_3(x) = \min \left( 0.01 \times d_j \times p_j \times \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I x_{ij}^k \right) \quad (3)$$

式中:  $d_j$  为用户  $j$  所排放的污水中主要污染物的浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),通常 BOD、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$  等被作为主要污染物的衡量指标;  $p_j$  为用户  $j$  的污水排放系数,即在一定时间内污水排放量与用水量之比。

### 1.2 约束条件

(1) 水源可供水量约束

受水区各子区域的各用水部门的总水量不得大于该区域的可供水量,即:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J x_{cj}^k \leq W_c^k \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij}^k \leq W_i^k \quad (5)$$

式中:  $x_{cj}^k$  为公共水源  $c$  向  $k$  子区用户  $j$  的可供水量 ( $10^4 \text{ m}^3$ );  $W_c^k$  为公共水源  $c$  分配给  $k$  子区的供水量 ( $10^4 \text{ m}^3$ );  $x_{ij}^k$  为独立水源  $i$  向  $k$  子区用户  $j$  的供水量 ( $10^4 \text{ m}^3$ );  $W_i^k$  为独立水源  $i$  分配给  $k$  子区的供水量 ( $10^4 \text{ m}^3$ );  $J$  为区域内用户个数;  $K$  为区域个数;  $C$  为公共水源个数;  $I$  为独立水源个数。

(2) 用户需水能力约束

用户直接获取水量不得大于用户需水量,即:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{c(i)=1}^{C(i)} x_{ij}^k \leq D_j \quad (6)$$

式中:  $D_j$  为用户  $j$  的规划需水量 ( $10^4 \text{ m}^3$ )。

(3) 水源输水能力约束

对于每一个子区域来说,其各个部门所分配的水量,均小于或等于供水工程最大输水能力:

$$x_{cj}^k \leq Q_c^k; x_{ij}^k \leq Q_i^k \quad (7)$$

式中:  $Q_c^k$  为  $k$  子区公共水源  $c$  的最大输水能力 ( $10^4 \text{ m}^3$ );  $Q_i^k$  为  $k$  子区独立水源  $i$  的最大输水能力 ( $10^4 \text{ m}^3$ )。

(4) 重要污染物排放量约束

$$0.01 \times d_j \times p_j \times \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I x_{ij}^k \leq p_0 \quad (8)$$

式中:  $d_j$  为用户  $j$  所排放的污水中主要污染物的浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $p_j$  为用户  $j$  污水排放系数;  $p_0$  为  $k$  子区污染物的最大允许排放量 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。

对于这样一个多目标非线性模型,本文主要是通过调用 MATLAB 软件中 fgoalattain 函数优化工具箱实现模型的优化求解。

## 2 水资源配置效果评价

水资源配置效果的评价,具体来讲就是对每一种配水方案的综合效益进行评价,然后选出效益最佳的方案<sup>[2]</sup>。灰色关联分析法<sup>[3-4]</sup>、D-S 证据理论<sup>[5-6]</sup>、逼近理想解法 (TOPSIS) 法<sup>[7-8]</sup>、概率神经网络<sup>[9-10]</sup>、格序理论<sup>[11-12]</sup>、模糊熵模型<sup>[13-14]</sup>、主成分分析法<sup>[15-16]</sup>等方法,是目前普遍使用的一些水资源配置效果评价方法。这些方法都有各自的优缺点,因此本文选取模糊物元评价模型和主成分分析效果评价模型 2 种

方法进行评价计算,可以优劣互补,最终通过方案优劣对比明确宁夏中南部调水工程对受水区带来的效果影响,并确定出水资源配置的最优模式。

## 2.1 AHP-变异系数法组合权重计算<sup>[17-18]</sup>

为了了解某些指标在水资源配置方案评价指标系统中的重要程度,必须要对其权重进行计算。选用什么方法确定权重尤为重要,对于单方面强调主观或者客观评价的计算方法,往往会对决策结果产生影响。为了最大限度避免甚至消除权重确定时由于主、客观的片面性赋权对决策结果造成的影响,本文选用AHP-变异系数法组合权重方法来避免片面赋权单方面造成的误差,使评价结果更加客观合理。计算公式如下:

$$w_i = \frac{\alpha_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \varphi_i} \quad (9)$$

式中: $w_i$ 为第*i*个评价指标的组合权重; $n$ 为评价指标个数; $\alpha_i$ 为变异系数法确定的第*i*个评价指标权重; $\varphi_i$ 为层次分析法确定的第*i*个评价指标权重。

## 2.2 模糊物元综合评价方法<sup>[17-18]</sup>

1983年,蔡文教授在大量理论研究的基础上推出了物元分析法,该方法首次采用“事物、特征、量值”三要素对事物的状态进行描述<sup>[19]</sup>。模糊物元综合评价方法则是将模糊理论引入物元分析法,通过分析事物参数变化规律对相关问题进行模糊处理,最终有效解决事物间互不相容问题<sup>[20]</sup>。水资源配置效果评价中运用模糊物元综合评价方法,具有较强的模糊性和主观性特征,通过对评价指标集建立隶属度函数,然后计算标准模糊物元与差平方复合模糊物元,利用指标权重通过欧式贴近度求得综合评价得分值,根据得分值进行最终的配置效果分析。具体方法及步骤如下:

(1) 从优隶属度计算公式如下:

$$\text{越大越优型: } u_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (10)$$

$$\text{越小越优型: } u_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (11)$$

式中: $u_{ij}$ 为指标的最优隶属度值; $x_{ij}$ 为第*i*个评价指标在第*j*项方案中所对应的量值( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ ); $\max x_{ij}$ 、 $\min x_{ij}$ 为所有配置方案中某项评价指标对应的最大值和最小值。

越大越优型是正向指标,指标值越大,评价结

果越好。越小越优型是逆向指标,指标值越小,评价结果越好。

(2) 构造差平方复合模糊物元以及标准方案模糊物元

构造标准方案*n*维模糊物元 $R_{0n}$ 。

$$R_{0n} = \begin{bmatrix} M_0 \\ C_1 & u_1 \\ C_2 & u_2 \\ \vdots & \vdots \\ C_n & u_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $M_0$ 为配置方案; $C_n$ 为第*n*个评价指标; $u_n$ 为配置方案 $M_0$ 与评价指标 $C_n$ 对应指标值*x*的模糊量值,下同。

进一步计算标准模糊物元 $R_{0n}$ 和复合模糊物元 $R_m$ 各项差值的平方,以 $\Delta_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ )代表,进一步构建 $R_\Delta$ ,表示为:

$$R_\Delta = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & \Delta_{11} & \Delta_{12} & \cdots & \Delta_{m1} \\ C_2 & \Delta_{21} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & \Delta_{n1} & \Delta_{n2} & \cdots & \Delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

(3) 欧式贴近度和综合评价

由AHP-变异系数法指标组合权重构造权重复合物元 $R_w$ 。

$$R_w = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ w_1 & w_2 & \cdots & w_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: $w_1, w_2, \dots, w_n$ 为各项评价指标 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 所对应的组合权重。

由于本研究采用的是综合评价方法,需要进一步引入 $M(*, +)$ 算法,那么:

$$\rho H_j = 1 - \sqrt[n]{\sum_{i=1}^n w_i \Delta_{ij}} \quad (15)$$

$$(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$$

式中: $\rho H_j$ 为第*j*个方案的欧式贴近度。

欧式贴近度<sup>[19-21]</sup>在水资源配置评价中是一种可以体现配置方案与标准最优方案相互接近程度的算法,越大的计算结果表明两者越接近。欧式贴近度复合模糊物元可以表示为:

$$R_{\rho H} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ \rho H_1 & \rho H_2 & \cdots & \rho H_m \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $R_{\rho H}$ 为欧式贴近度复合模糊物元; $m$ 为配制方案个数; $M_m$ 为第*m*个配制方案。



### 2.3 主成分分析效果评价方法<sup>[17-18]</sup>

本次水资源配置效果评价所要采用的主要分析方法为主成分分析法,该方法具有一定的优势,它能够把社会、经济、生态等方面的众多因素量化为无量纲指标,很好地解决了各种指标量纲不同的矛盾性、综合性问题。同时,借助该方法也极大地减少了计算维度,可以较好的进行分析计算,并最终得到受水区水资源配置综合评价结果<sup>[21]</sup>。具体方法及步骤如下:

#### (1) 评价指标的标准化

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p) \quad (17)$$

式中:  $X'_{ij}$  为原始指标值标准化的值;  $X_{ij}$  为第  $i$  个样本第  $j$  个评价指标的原始值;  $\bar{X}_j$  为第  $j$  个指标的样本均值;  $S_j$  为第  $j$  个指标的样本标准差。

#### (2) 计算相关系数矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{np} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中,

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (19)$$

式中:  $R$  为  $n$  个样本数量  $p$  个评价指标构成的样本矩阵;  $n$  为样本总体数量;  $p$  为评价指标总体数量;  $r_{np}$  为第  $n$  个样本数量第  $p$  个评价指标对应的样本数据;  $r_{ij}$  为原变量  $x_i$  与  $x_j$  的相关系数;  $x_{ki}$  为第  $i$  个指标第  $k$  个样本对应的标准值;  $\bar{x}_i$  和  $\bar{x}_j$  为第  $i$  和第  $j$  个指标经过标准化后得到的样本均值数据。

#### (3) 计算特征值和特征向量

求解特征方程:

$$|\lambda I - R| = 0 \quad (20)$$

式中:  $\lambda$  为特征值;  $I$  为单位矩阵;  $R$  为  $n$  个样本数量  $p$  个评价指标构成的样本矩阵。

求解特征值  $\lambda_i$  ( $i=1, 2, \dots, p$ ) 通常使用的方法是雅克比法。据此求出特征值后,并按照大小次序排列,之后将特征值  $\lambda_i$  所对应的特征向量  $a_i$  ( $i=1, 2, \dots, p$ ) 依次求出,要求  $\|a_i\|=1$ 。

#### (4) 计算贡献率

主成分的贡献率为:

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \quad (i=1, 2, \dots, p) \quad (21)$$

累计贡献率为:

$$P = \sum_{i=1}^p p_i \quad (i=1, 2, \dots, p) \quad (22)$$

式中:  $\lambda_i$  为第  $i$  个特征值 ( $i=1, 2, \dots, p$ );  $p_i$  为第  $i$  个贡献率;  $P$  为  $p$  个贡献率之和。

通常累计贡献率达到 85% 以上的特征值  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  所对应的第 1, 2,  $\dots, m$  ( $m \leq p$ ) 个主成分。

#### (5) 计算主成分荷载

$$l_{ij} = \sqrt{\lambda_j} a_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, m) \quad (23)$$

$$a_{ij} = \frac{l_{ij}}{\sqrt{\lambda_j}} \quad (i=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, m) \quad (24)$$

式中:  $l_{ij}$  为第  $i$  个特征值第  $j$  个主成分对应的主成分荷载;  $\lambda_j$  为第  $j$  个主成分的特征值;  $a_{ij}$  为第  $i$  个特征值第  $j$  个主成分对应的特征向量。

#### (6) 计算主成分综合得分值

$$Z_i = a_{1i}x_{1i} + a_{2i}x_{2i} + \cdots + a_{pi}x_{pi} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (25)$$

$$Z = \sum_{i=1}^m p_i Z_i \quad (26)$$

式中:  $Z_i$  为每个特征向量与对应的标准化指标值的乘积值总和;  $a_{pi}$  为第  $p$  个特征值第  $i$  累计贡献率达到 85% 以上的主成分对应的特征向量;  $x_{pi}$  为第  $p$  个特征值第  $i$  累计贡献率达到 85% 以上的主成分对应的标准值;  $Z$  为第  $i$  个主成分贡献率  $p_i$  与对应的  $Z_i$  乘积值总和。

## 3 宁夏中南部调水工程受水区水资源配置及效果评价

### 3.1 水资源配置方案集设置

目前由于干旱区生态环境比较脆弱,所以在对受水区水资源进行优化配置时,必须要保证合理的生态用水。当前的大多水资源配置,给予了生态环境一定的需水量考虑,但鲜有将其置于优先考虑的位置。本文在配置水资源的工作过程中,以生活优先和生态优先 2 种思路进行配置,即在满足生活、工业、农业、生态用水部门的最小需水条件下分别对生活 and 生态用水进行优先配置,以确定最优的水资源配置模式。

本文主要研究中南部调水工程对受水区产生

的水资源配置效果,为最大限度避免其他因素干扰,直接采用“有、无”中南部调水工程的对比分析方法设置水资源配置方案集,目的是直观的体现出调水工程对受水区带来的水资源配置效果影响。根据水源的组成和水资源的配置顺序进行方案集的设置,共计8种配置方案(表1)。

3.2 水资源优化配置计算<sup>[22]</sup>

受水区规划的水源种类主要有6种,即*i*=6,具体见下表;用水户分为生活、工业和生态以及农业4种,也就是*j*=4。根据供水水源所对应的不同用水户,确定相应的决策变量。采用目标逼近法调用fgoalattain函数,经过8次运算后,受水区规划年75%保证率下优化配置结果见表2。

3.3 指标及权重计算结果

根据表2的水资源优化配置结果,进一步对各方方案的评价指标值进行计算,计算结果见表3。

采用层次分析法进一步对权重进行计算,详见表4。

通过变异系数法计算指标权重结果如下:

$\alpha_1=0.040, \alpha_2=0.110, \alpha_3=0.025, \alpha_4=0.103, \alpha_5=0.113, \alpha_6=0.096, \alpha_7=0.480, \alpha_8=0.026, \alpha_9=0.007。$

最后运用公式(9)计算综合权重: $w_1=0.171, w_2=0.188, w_3=0.017, w_4=0.131, w_5=0.131, w_6=0.079, w_7=0.036, w_8=0.009, w_9=0.001。$

3.4 模糊物元综合评价计算

(1) 构造标准方案模糊物元  $R_{0n}$ :

$$R_{0n} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 & C_8 & C_9 \\ M_0 & 1.5589 & 0.1945 & 0.4530 & 2.6544 & 0.2800 & 0.2355 & 0.0000 & 0.6133 & 0.2196 \end{bmatrix}$$

(2) 构造差平方模糊物元  $R_{\Delta}$ :  $R_{\Delta} = (R_{0n} - R_{mn})^2$ :

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 & M_7 & M_8 \\ C_1 & 0.0000 & 0.0686 & 0.0000 & 0.0686 & 0.0008 & 0.0786 & 0.0008 & 0.0786 \\ C_2 & 0.0002 & 0.0213 & 0.0002 & 0.0213 & 0.0000 & 0.0176 & 0.0000 & 0.0176 \\ C_3 & 0.0025 & 0.0025 & 0.0025 & 0.0025 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ C_4 & 0.6019 & 1.1916 & 0.6019 & 1.1916 & 0.0000 & 0.1905 & 0.0000 & 0.1905 \\ C_5 & 0.0001 & 0.0121 & 0.0004 & 0.0121 & 0.0000 & 0.0121 & 0.0004 & 0.0169 \\ C_6 & 0.0064 & 0.0090 & 0.0050 & 0.0074 & 0.0001 & 0.0009 & 0.0000 & 0.0005 \\ C_7 & 0.0093 & 0.0780 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0035 & 0.0556 & 0.0000 & 0.0000 \\ C_8 & 0.0000 & 0.0050 & 0.0004 & 0.0034 & 0.0005 & 0.0057 & 0.0001 & 0.0004 \\ C_9 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

(3) 根据组合权重结果构造指标权重复合物元  $R_w$ :

$$R_w = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 & C_8 & C_9 \\ w_i & 0.171 & 0.188 & 0.017 & 0.131 & 0.079 & 0.036 & 0.368 & 0.009 & 0.001 \end{bmatrix}$$

(4) 计算欧式贴近度复合模糊物元  $R_{\rho H}$ :

$$R_{\rho H} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 & M_7 & M_8 \\ \rho H_j & 0.713 & 0.551 & 0.719 & 0.584 & 0.962 & 0.749 & 0.987 & 0.792 \end{bmatrix}$$

表1 受水区的水资源优化配置方案集

Tab. 1 Set of reasonable water resources allocation schemes in the water receiving area

规划水平年	供水顺序	方案	地表水	地下水	杨黄水	东山坡工程	中南部调水工程	中水
2020	生活优先	1	√	√	√	√	√	√
		2	√	√	√	√		√
	生态优先	3	√	√	√	√	√	√
		4	√	√	√	√		√
2025	生活优先	5	√	√	√	√	√	√
		6	√	√	√	√		√
	生态优先	7	√	√	√	√	√	√
		8	√	√	√	√		√

注:“√”表示方案中采取此措施。

表2 受水区规划年水资源优化配置结果

Tab. 2 Results of optimal allocation of water resources in the planned receiving year /10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>

方案	用水部门	地表水	地下水	扬黄水	东山坡饮水工程	中南部调水工程	中水	合计
方案1	生活	167	582	346	363	2784	0	4242
	工业	552	475	2322	369	936	490	5144
	生态	4988	0	0	0	0	0	4988
	农业	4109	1917	1729	0	0	0	7755
	合计	9816	2974	4397	732	3720	490	22129
方案2	生活	1724	1255	833	430	0	0	4242
	工业	708	65	1543	302	0	490	3108
	生态	3162	0	0	0	0	0	3162
	农业	4222	1645	2021	0	0	0	7897
	合计	9816	2974	4397	732	0	490	18409
方案3	生活	132	594	377	321	2696	0	4120
	工业	434	526	2149	411	1024	490	5034
	生态	5954	0	0	0	0	0	5954
	农业	3296	1854	1871	0	0	0	7021
	合计	9816	2974	4397	732	3720	490	22129
方案4	生活	1657	1362	875	251	0	0	4145
	工业	493	17	1543	481	0	490	3024
	生态	5954	0	0	0	0	0	5954
	农业	1712	1595	1979	0	0	0	5286
	合计	9816	2974	4397	732	0	490	18409
方案5	生活	144	610	330	352	2806	0	4242
	工业	925	559	1720	377	914	808	5303
	生态	5360	0	0	0	0	0	5360
	农业	3387	1981	2347	0	0	0	7715
	合计	9816	3150	4397	729	3720	808	22620
方案6	生活	1324	1629	1123	166	0	0	4242
	工业	962	49	1468	563	0	808	3850
	生态	3597	0	0	0	0	0	3597
	农业	3933	1472	1806	0	0	0	7211
	合计	9816	3150	4397	729	0	808	18900
方案7	生活	106	433	173	482	2940	0	4134
	工业	463	617	1964	247	780	808	4879
	生态	5954	0	0	0	0	0	5954
	农业	3293	2100	2260	0	0	0	7653
	合计	9816	3150	4397	729	3720	808	22620
方案8	生活	1280	1469	920	373	0	0	4042
	工业	826	72	1274	356	0	808	3336
	生态	5954	0	0	0	0	0	5954
	农业	1756	1609	2203	0	0	0	5568
	合计	9816	3150	4397	729	0	808	18900

注：水文年份  $P=75\%$  的枯水年份。

通过计算欧式贴近度数值可得出以下结果：方案7>方案5>方案8>方案6>方案3>方案1>方案4>方案2，方案7为最优方案。在只有中南部调水工程最为单一变量因素对比的方案中，即方案1、2，方案3、4，方案5、6，方案7、8两两对比下，方案1、3、5、7欧式贴近度分值分别高于方案2、4、6、8的分

chinaXiv:202112.00075v1

表3 各项指标计算结果

Tab. 3 Calculation results of various indicators

指标	2020年				2025年			
	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6	方案7	方案8
人均用水量/m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup>	155.89	129.69	155.89	129.69	153.01	127.85	153.01	127.85
区域缺水率/%	20.71	30.04	20.71	34.04	19.45	32.70	19.45	32.70
城镇化率/%	40.29	40.29	40.29	40.29	45.30	45.30	45.30	45.30
人均GDP/10 <sup>4</sup> 元·人 <sup>-1</sup>	1.8786	1.5628	1.8786	1.5628	2.6544	2.2179	2.6544	2.2179
万元工业产值用水量 /m <sup>3</sup> ·(10 <sup>4</sup> 元) <sup>-1</sup>	27.00	17.00	26.00	17.00	28.00	17.00	26.00	15.00
单方水GDP/元·m <sup>-3</sup>	155.58	140.60	164.87	149.26	227.35	206.28	235.45	213.08
生态缺水量/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	966.00	2792.00	0.00	0.00	594.00	2357.00	0.00	0.00
纳污能力/%	68.91	61.87	70.88	63.08	66.68	61.33	70.04	63.23
城市人均绿化面积/m <sup>2</sup> ·人 <sup>-1</sup>	21.24	21.24	21.24	21.24	21.96	21.96	21.96	21.96

表4 层次分析(AHP)法各指标权重

Tab. 4 Weight of each indicator of analytic method

准则层		指标层		APH法权重
指标	权重	指标	权重	
社会效率	0.648	人均用水量	0.637	0.413
		区域缺水率	0.258	0.167
		城镇化率	0.105	0.068
经济效率	0.230	人均GDP	0.540	0.124
		万元工业产值用水量	0.297	0.068
		单方水GDP	0.163	0.037
生态效率	0.122	生态缺水量	0.614	0.075
		纳污能力	0.268	0.033
		城市人均绿化面积	0.117	0.014

值。在配置水量相同的对比方案中,即方案5、7,方案1、3,方案6、8,方案2、4两两对比下,方案7、3、8、4欧式贴近度分值分别高于方案5、1、6、2的分值,说明基于生态优先的水资源配置方案优于基于生活优先的水资源配置方案。这表明在水资源配置过程中,生态环境已成为不可忽视的一部分。按照2020年和2025年2个规划年划分,其他因素变量完全相同的水资源配置方案中,方案5、1,方案7、3,方案8、4,方案6、2两两对比下,方案5、7、8、6欧式贴近度分值分别高于方案1、3、4、2的分值,可以看出在有中南部调水工程参与的受水区配置过程中,水资源量越多配置结果越优。

3.5 主成分分析效果评价计算<sup>[23-24]</sup>

采用SPSS统计分析软件进行主成分分析,对受水区指标计算结果进行数据降维及因子分析处理,对主成分进行有效的筛选,并得出其特征值和贡献

率,见表5。

由表5的计算结果可以看出,以上2个主成分的累计贡献率达到了90.249%,并>85%,对于受水区受所选取的指标评价因子的影响程度具有一定的代表性,并能体现中南部调水工程对受水区的重要程度,因此前2个主成分可以进行数据分析,见表6。

由表6的计算结果可知,其中第一主成分与人均GDP还有人均用水量、单方水GDP及纳污能力之间存在较大正相关性,与区域缺水率存在较强负相

表5 主成分特征值及贡献率

Tab. 5 Characteristic values and contribution rates of principal components

主成分	特征值	贡献率/%	累计共献率/%
1	4.728	52.535	52.535
2	3.394	37.714	90.249

表6 主成分荷载矩阵

Tab. 6 Load matrix of principal components		
指标	成分1	成分2
人均用水量	0.897	-0.586
区域缺水率	-0.894	0.423
城镇化率	0.511	0.859
人均GDP	0.846	0.524
万元工业产值用水量	0.851	-0.515
单方水GDP	0.726	0.684
生态缺水量	-0.530	0.181
纳污能力	0.768	-0.598
城市人均绿化面积	0.511	0.859

表7 主成分变量值

Tab. 7 Variable values for each principal component		
指标	变量(A <sub>1</sub> )	变量(A <sub>2</sub> )
人均用水量	0.17	-0.17
区域缺水率	-0.19	0.12
城镇化率	0.11	0.25
人均GDP	0.16	0.15
万元工业产值用水量	0.17	-0.15
单方水GDP	0.15	0.20
生态缺水量	-0.11	0.05
纳污能力	0.16	-0.18
城市人均绿化面积	0.11	0.25

关,这些指标涉及到社会经济水平及生态环境状况2个方面,其本身具备了较强的综合性。第二主成分计算结果表明,其与城市人均绿化面积以及城镇化率之间呈现出正相关性,反映了受水区城镇居民生活环境质量。

综合2个主成分的指标结果,对水资源配置效果影响程度最大的为人均用水量和万元工业产值用水量。为了满足水资源可持续利用并兼顾当下和未来的发展需求,人类社会在追求利益的同时,更应该重视生态环境的健康和谐发展,所以降低人均生活用水量和万元工业产值用水量是提高受水区水资源综合效益的重要保障。将上表主成分荷载矩阵结果复制到新建立的SPSS,进行转换计算主成分变量值A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>,见表7。

将原始数据进行标准化,利用Excel表格计算每一个处理的主成分,先将表7中的变量值A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>作为公式系数进行综合评价函数F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>计算,见表8。

根据2个主成分的贡献率值求出2个主成分权重值分别为 $\omega_1=0.838$ ,  $\omega_2=0.161$ ,然后确定F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>对应每个方案的隶属函数值U<sub>1</sub>、U<sub>2</sub>,最后得到综合得分D值,见表9。

由表9知,8个方案的得分优劣排序为:方案7>方案5>方案3>方案1>方案8>方案6>方案4>方案2。其中,方案7的得分值最高,为最优方

案。根据方案的优劣排序也可以看出,有中南部调水工程参与的水资源配置方案得分值均大于没有该调水工程的水资源配置方案。同时,从2020年和2025年2个规划年的4个方案得分对比出一个共同结果,在生态需水优先配置的前提下,评价结果的得分值普遍要高于以生活优先为前提的水资源配置方案,基于此对受水区配置水量越多的方案得分值越高。

3.6 2种评价结果对比分析

将受水区8个水资源优化配置方案分别使用主成分分析效果评价和模糊物元综合评价2种评价方法的结果进行对比,详见表10。

根据表10,可将8个方案大致划分为2个等级,等级Ⅰ均为有中南部调水工程参与的水资源配置方案,等级Ⅱ中的方案都没有调水工程参与。在只有中南部调水工程的调水量作为单因素变量的对比方案中,即1和2、3和4、5和6、7和8对比,有中南部调水工程参与配置的方案均优于无中南部调水工程参与配置的方案。在调水和其他配置相同的情况下,基于生态优先配置的结果均优于基于生活优先的水资源配置结果。

2种评价结果都确定方案7的水资源配置情况结果最优、方案2的水资源配置情况结果最差,在等级划分上,模糊物元模型和主成分分析模型存在一

表8 各主成分对应的F值

Tab. 8 F values for each principal component								
F值	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6	方案7	方案8
F <sub>1</sub>	0.208	-1.436	0.390	-1.081	1.198	-0.460	1.366	-0.187
F <sub>2</sub>	-1.265	-0.226	-1.323	-0.360	0.393	1.289	0.306	1.186

注:F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>为变量A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>对应的综合评价函数。



表9 各方案综合得分D值

Tab. 9 D value of the comprehensive score of each plan

方案	隶属函数值( $U_1$ )	隶属函数值( $U_2$ )	综合得分D值
1	0.5869	0.0223	0.495
2	0.0001	0.4200	0.068
3	0.6517	-0.0001	0.546
4	0.1269	0.3687	0.166
5	0.9401	0.6569	0.894
6	0.3484	0.9999	0.453
7	1.0000	0.6238	0.938
8	0.4459	0.9604	0.482

表10 2种评价结果对比

Tab. 10 Comparison of the two evaluation results

方案	模糊物元模型	优劣排序	主成分分析模型	优劣排序
1	0.713	6	0.495	4
2	0.551	8	0.068	8
3	0.719	5	0.546	3
4	0.584	7	0.166	7
5	0.962	2	0.894	2
6	0.749	4	0.453	6
7	0.987	1	0.938	1
8	0.792	3	0.482	5

定差异,即主成分分析中凡是采用了中南部工程调水的方案均比没有中南部调水工程的方案优,而模糊物元评价结果表明调水越多,方案越优。此外,主成分分析的评价结果优劣差异更为明显。

4 结论

宁夏中南部调水工程不仅为受水区补充大量水资源,也为受水区带来了机遇和挑战。本文首先对调水工程受水区的水资源配置效果评价指标体系和评价方法进行系统的研究,进一步采用主成分分析评价方法和模糊物元综合评价方法对水资源配置方案进行效果评价分析。结果表明,2025年基于生态优先的有中南部调水工程参与时的水资源配置方案为最优方案;模糊物元评价结果表明凡是采用了中南部工程调水的方案均比没有中南部调水工程的方案优,而主成分分析的评价也具有相同的结果,并且采用该方法评价结果优劣差异更为明显。评价结果同时也表明除了采用中南部工程调水方案均比没有中南部调水工程的方案优,还可以发现受水区配置的水资源量越多,方案越优。从水

资源优化配置角度看,基于生态优先的水资源配置方案结果优于基于生活优先的水资源配置结果,这表明我们在进行区域水资源配置时,务必要考虑生态环境因素,并置于优先位置,这将会进一步促进区域水资源及生态环境系统形成良性循环。

参考文献(References)

[1] 李洋. 南水北调对受水区水资源配置效果影响评价研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011. [Li Yang. Research on the impacts of south-to-north water diversion to water resources allocation in the intake areas[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011. ]

[2] 崔萌. 水资源配置效果评价指标体系和模型研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2005. [Cui Meng. Study on evaluation index system and model of water resources allocation effect[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2005. ]

[3] 王庆杰, 岳春芳, 李艺珍. 基于权重融合的灰色关联分析水资源配置方案评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2019, 16(4): 31-34. [Wang Qingjie, Yue Chunfang, Li Yizhen. The evaluation of water resources allocation schemes based on weight-fusion grey relational analysis method[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019, 16(4): 31-34. ]

[4] 谷亚男. 基于灰色关联分析法探析我国水资源开发利用状况[J]. 山西农经, 2019, 11(9): 39-41. [Gu Ya'nan. Analysis of water resources development and utilization in China based on grey relational analysis[J]. Shanxi Agricultural Economy, 2019, 11(9): 39-41. ]

[5] 董前进, 陈森林, 张柳波, 等. 基于D-S证据理论的水资源合理配置方案综合评价[J]. 数学实践与认识, 2011, 41(23): 26-30. [Dong Qianjin, Chen Senlin, Zhang Liubo, et al. Comprehensive evaluation of rational water resources allocation alternatives based on D-S evidence theory[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41(23): 26-30. ]

[6] 方会超, 杭爱. 基于D-S证据理论的辽宁省水资源短缺风险评估[J]. 地下水, 2019, 41(2): 125-126. [Fang Huichao, Hang Ai. Risk assessment of water shortage in Liaoning Province based on D-S evidence theory[J]. Underground Water, 2019, 41(2): 125-126. ]

[7] 崔振才, 曹广占, 刘秋生, 等. 应用逼近理想解法综合评价区域水资源承载能力[J]. 水文, 2006, 26(5): 7-10. [Cui Zhencai, Cao Guangzhan, Liu Qiusheng, et al. Comprehensive assessment of regional water resources carrying capacity by using similarity to ideal solution[J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(5): 7-10. ]

[8] 孙国营, 陕振沛, 孙新杰, 等. 基于TOPSIS-灰色关联方法的水资源配置评价模型研究[J]. 节水灌溉, 2019(7): 68-71. [Sun Guoying, Shan Zhenpei, Sun Xinjie, et al. Research on water resources allocation evaluation model based on TOPSIS-grey correlation method[J]. Water Saving Irrigation, 2019(7): 68-71. ]

[9] 曹赛男. 基于概率神经网络的水资源可持续利用评价研究[D].

- 成都: 成都理工大学, 2017. [Cao Sainan. Evaluation of sustainable utilization of water resources based on probabilistic neural network[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. ]
- [10] 崔东文, 郭荣. 基于概率神经网络的文山市水资源配置合理性评价分析[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(10): 57-62. [Cui Dongwen, Guo Rong. Evaluation of rational water allocation based on probabilistic neural network: Case study of Wenshan Prefecture [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(10): 57-62. ]
- [11] 吴凤平, 贾鹏, 张丽娜. 基于格序理论的水资源配置方案综合评价[J]. 资源科学, 2013, 35(11): 2232-2238. [Wu Fengping, Jia Peng, Zhang Lina. Comprehensive evaluation of water resources allocation based on lattice-order theory[J]. Resource Science, 2013, 35(11): 2232-2238. ]
- [12] 魏光辉. 基于格序理论的水利工程方案优选[J]. 黑龙江大学学报, 2014, 5(1): 18-22. [Wei Guanghui. Optimization of hydraulic engineering schemes based on lattice-order theory[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2014, 5(1): 18-22. ]
- [13] 布瑶. 基于模糊综合评价和主成分分析的水资源承载力评价研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019. [Bu Yao. Evaluation of water resources carrying capacity based on fuzzy comprehensive evaluation and principal component analysis[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019. ]
- [14] 张燕妮, 魏晓妹. 基于模糊物元模型的灌区水资源综合效益评价[J]. 人民长江, 2009, 40(20): 64-66. [Zhang Yanni, Wei Xiaomei. Comprehensive benefit evaluation of water resources in irrigation area based on fuzzy-matter-element model[J]. Yangtze River, 2009, 40(20): 64-66. ]
- [15] 康爱红. 基于主成分分析的城市水资源分析及优化配置[D]. 石家庄: 河北工程大学, 2019. [Kang Aihong. Analysis and optimal allocation of urban water resources based on principal component analysis[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Engineering, 2019. ]
- [16] 童纪新, 顾希. 基于主成分分析的南京市水资源承载力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 122-125. [Tong Jixin, Gu Xi. Study on water resources carrying capacity of Nanjing City based on principal component analysis[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(1): 122-125. ]
- [17] 郭娇, 李金燕. 基于主客观组合赋权的水资源模糊物元综合评价[J]. 人民长江, 2020, 51(7): 106-111. [Guo Jiao, Li Jinyan. Comprehensive evaluation of water resources of fuzzy matter element based on subjective and objective combination weighting[J]. Yangtze River, 2020, 51(7): 106-111. ]
- [18] 郭娇. 宁夏中南部调水工程对受水区水资源配置效果评价研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020. [Guo Jiao. Evaluation of water resources allocation effect of water transfer project in central and southern Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020. ]
- [19] 王雪姣, 艾萍, 丁青云. 基于组合权重的模糊物元模型在水利现代化评价中的应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2015, 37(2): 1-5. [Wang Xuejiao, Ai Ping, Ding Qingyun. Application of fuzzy-matter-element model based on combined weights in evaluation of water resources modernization[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2015, 37(2): 1-5. ]
- [20] 夏玮静, 王宁练, 沈月. 基于流域的陕西省水资源承载力研究[J]. 干旱区地理, 2020, 39(9): 602-611. [Xia Weijing, Wang Ninglian, Shen Yue. Water resources carrying capacity of Shaanxi Province at the scales of watersheds[J]. Arid Land Geography, 2020, 39(9): 602-611. ]
- [21] 周泰, 袁波. 基于模糊物元欧式贴近度的区域物流发展水平评价[J]. 物流科技, 2016, 39(3): 13-17. [Zhou Tai, Yuan Bo. The evaluation of regional logistics development based on Euclid approach degree of fuzzy-matter-element[J]. Logistics Sci-Tech, 2016, 39(3): 13-17. ]
- [22] 李金燕. 基于生态优先的宁夏中南部干旱区域水资源合理配置研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2014. [Li Jinyan. Study on rational allocation of water resources in arid areas of central and southern Ningxia based on ecological priority[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014. ]
- [23] 热依莎·吉力力. 哈萨克斯坦水环境与水资源现状及问题分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(3): 518-527. [Jilili Reysa. Water environment and water resource use issues of Kazakhstan[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(3): 518-527. ]
- [24] 王旋, 陈亚宁, 李稚. 基于模糊综合评价模型的中亚水资源开发潜力评估[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 126-134. [Wang Xuan, Chen Yaning, Li Zhi. Assessment of the development potential of water resources in Central Asia based on fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 126-134. ]

## Evaluation on the effect of water resources allocation in the water receiving area of the central and southern Ningxia water transfer project

LI Jinyan, GUO Jiao, CUI Lanbo, DOU Miao

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

**Abstract:** As the only large-scale water transfer project within Ningxia Province, China, the water transfer project in central and southern Ningxia involves transferring water from the Jing River Basin, which has relatively rich surface water, on Liupan Mountain, to the Qingshui River Basin, which has poor surface water. With a water supply pattern that depends on the pumping water of the Yellow River and piloting water from the Jing River and regional water resources in receiving areas, studies should determine how all types of water supply resources can be fully and reasonably used. The local government and water administration department should ensure that water resource management can provide not only remarkable social and economic benefits but also environmental benefits. However, for water-receiving areas in the water transfer project, the original water supply structure changes, and the water resource system becomes reorganized. Therefore, the scheme should be comprehensively evaluated at a high level based on water resource allocation schemes to analyze the effect of the water transfer project on receiving areas and demonstrate the effect of water resource allocation schemes. All schemes are comprehensively optimized based on economy, society, and ecological environment, and optimization results are considered as the decision basis. Project implementation considerably affects the water resource allocation patterns in water-receiving areas. In this study, given the characteristics of the multi-objective and fuzzy incompatibility of water resource allocation, the research target was the effect of the water transfer project on water resource allocation in a given receiving area. From the perspectives of life and ecology priorities, a water resource allocation plan was selected with or without the participation of the water transfer project at planning levels in 2020 and 2025. Evaluation indicators were selected based on three aspects: social, economic, and ecological. Then, an index evaluation system was established. Principal component analysis and fuzzy matter-element comprehensive evaluation were performed to calculate. The final scores of the two methods were ranked according to their strengths and weaknesses, which were then compared and analyzed. Both evaluation results indicate that the best water resource allocation scheme is the one with the participation of the water transfer project based on ecological priority. Fuzzy matter-element evaluation results reveal that all schemes using the water transfer project are better than those without the water transfer project in the central and southern regions. The higher the water resource allocation in water-receiving areas, the better is the plan. In summary, the two evaluation results showed that the water transfer project in central and southern Ningxia has promoted the socioeconomic development of the water-receiving area and provided ecological and environmental benefits.

**Key words:** central and southern Ningxia water transfer project; water resources allocation; evaluation of water resources allocation; principal component analysis; fuzzy matter-element comprehensive evaluation